

軸受鋼の超長寿命確率疲労特性に関するラウンドロビンテストの中間集約

材料強度確率モデル研究会 (代表者・酒井達雄：立命館大学理工学部)

石塚弘道、石原外美、磯西和夫、上野 明、岡田憲司、小熊規泰、越智保雄、金光 学、皮籠石紀雄、黒島義人、高 行男、後藤真宏、酒井達雄、境田彰芳、榊原正仁、坂本英俊、塩澤和章、菅田 淳、武田光弘、徳納久睦、中島正貴、中村 孝、西川 出、長谷川達也、長谷川典彦、松村 隆、毛利雅志、森 要、森 清孝、森野数博、吉村達彦

1. 緒言

近年、各種機器・構造物の余寿命評価や信頼性確保に対する社会的要請が一段と高まるとともに、経済的理由からこれらの実製品に対する寿命延伸技術の確立が強く望まれている。これは設計時の耐用年数を超えて機器・構造物を長期間使用することにつながるもので、部材の長寿命域における疲労特性が重要な課題となる。

一方、金属材料の疲労特性については、多くの鉄鋼材料に関し $N=10^5 \sim 10^6$ 程度の応力繰返し数で $S-N$ 曲線が水平に折れ曲がり、明瞭な疲労限度が現れる一般的な傾向がある。しかし、高強度鋼や表面処理材に関し、 $S-N$ 曲線が $N=10^5 \sim 10^6$ の付近で一旦水平に折れ曲がって見掛けの疲労限度が現れた後、 $N=10^7$ 付近から $S-N$ 曲線が再び低下する 2 段折れ曲がり現象が、しばしば報告されている。¹⁾⁷⁾

この特異な疲労現象を実験的に再確認するために、本研究では材料強度確率モデル研究会 (代表者：立命館大学理工学部教授・酒井達雄)⁸⁾ で独自に開発した同一疲労試験機を多数設置して、同一材料・共通試験片による共同実験を計画的に実施した。本報では、こうして得られた高炭素クロム軸受鋼(SUJ2)に関する実験結果を示すとともに、破面観察結果と組み合わせて考察を加えた。

2. 供試材および実験方法

2.1 供試材 本研究で用いた材料は高炭素クロム軸受鋼(SUJ2)であり、その化学成分を Table 1 に示す。試験片は直径 14.3mm の丸棒素材から、研削しろ 0.1mm を見込んで Fig.1 の形状寸法に切削加工し、この時点で焼入れ (835°Cx40min→油冷(80°C))・焼戻し (180°Cx120min→空冷) の熱処理を施した後、円筒研削にて最終仕上げを行った。環状切欠き部はすべて砥粒サイズ#100 の砥石で研削し、そのまま疲労試験を行った。切欠き半径は $R=7\text{mm}$ であり、応力集中係数は $\alpha=1.06$ である。なお、Fig.2 の顕微鏡写真に示すように、本材料は焼戻しマルテンサイト地に微細な球状炭化物が均一に分布した組織になっている。

試験片切欠き部断面の表面近傍におけるビッカース硬さ H_v の分布状況を図示したのが、Fig.3 である。いずれの測定値も 750~795 の範囲に収まっており、硬さ

Table 1 Chemical composition (mass%).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni	Mo
1.01	0.23	0.36	0.012	0.007	1.45	0.06	0.04	0.02

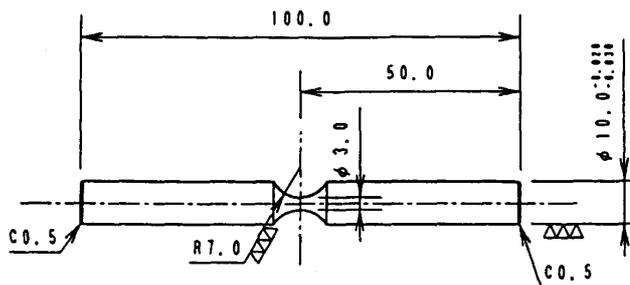


Fig.1 Configuration of fatigue specimen.

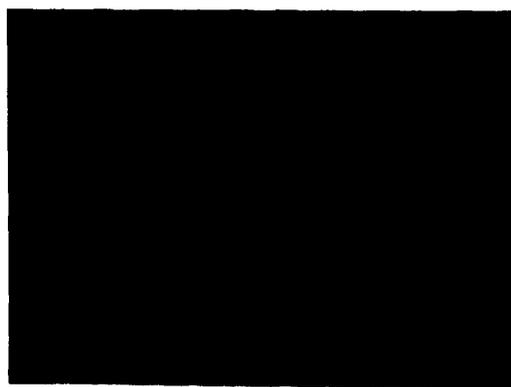


Fig.2 Microstructure of material.(x400)

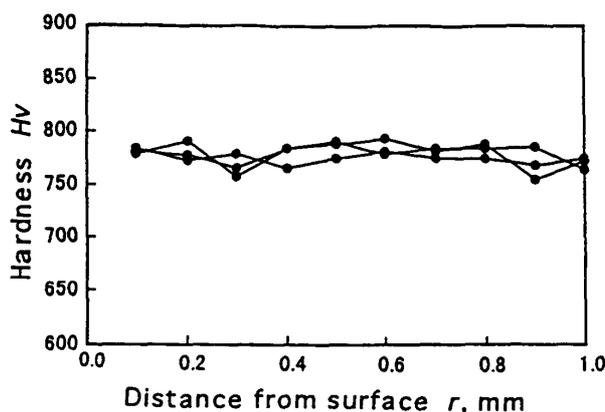


Fig.3 Hardness distributions on the cross section.

は殆ど均一に分布している。図中の全データの平均値は $H_v=778$ である。また、供試材料の清浄度は JIS 法(JIS

G 0555)にて、A系:0.012%(B+C)系:0.008%(A+B+C)系:0.020%なる分析結果を得ている。

2.2 実験方法 本研究では、軸受鋼(SUJ2)の広寿命域にわたるS-N特性を調べることに趣旨であり、そのためには低負荷レベルで長寿命域での疲労試験を行う必要がある。前節に示した特異な疲労挙動を明確に

とした。この場合の打ち切り繰返し数は 10^7 回とし、 $N=10^7$ における見掛けの疲労限度が求められた後、この打ち切り試験片についても疲労試験を継続し、超長寿命域の破断寿命をすべて求めることにした。さらに、すべての試験片に対して、破断後にSEMによる破面観察を行って、疲労き裂の発生起点を確認した。

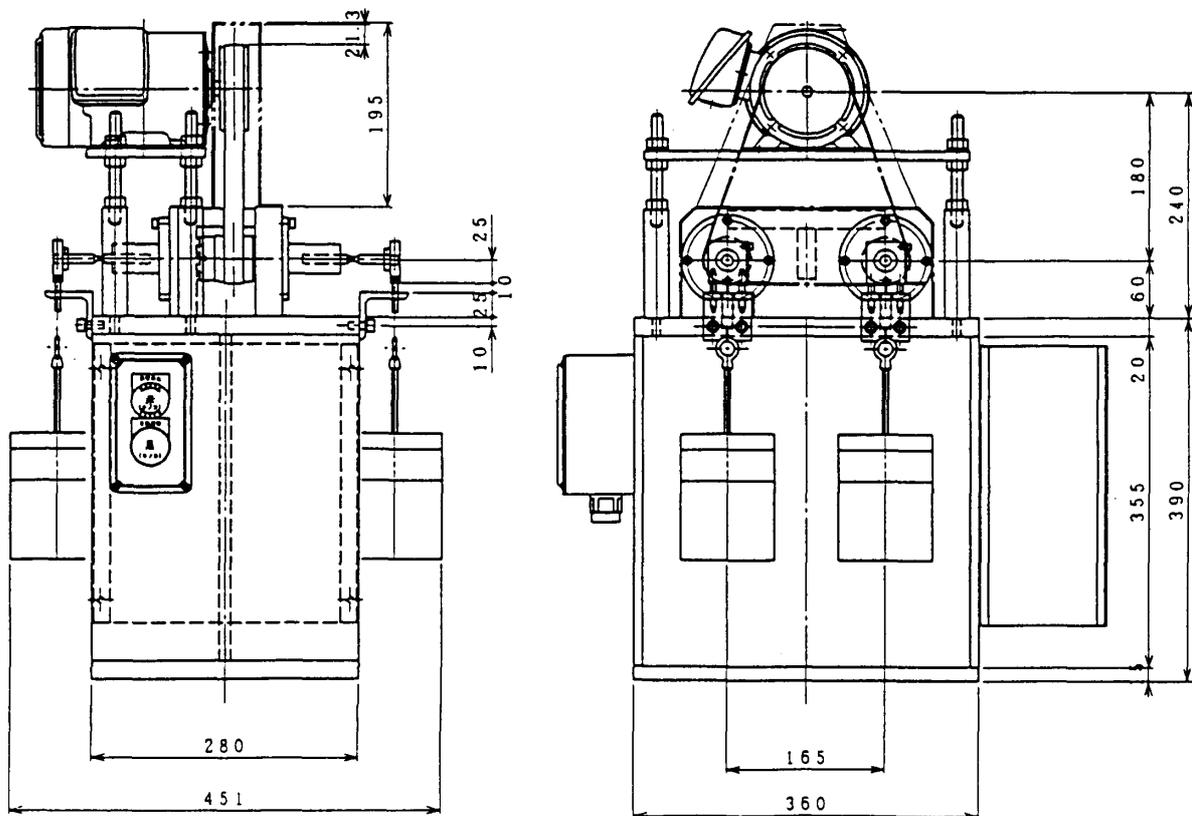


Fig.4 Fatigue testing machine developed by the research group for statistical aspects of material strength.

調べるためには、少なくとも 10^9 程度の超長寿命域まで対象とした疲労試験を実施しなければならない。しかも、多数の試験片を用いることが望ましく、通常の疲労試験機により試験片1本ずつ試験する方法では、原理的に大きな困難を伴う。

この問題を克服するために、材料強度確率モデル研究会⁸⁾において高精度・高効率の4連式回転曲げ疲労試験機を独自に開発した。この試験機はFig.4に示すように、1台のモーターにより平ベルトを介して2本の主軸を回転させる構造になっており、各主軸の両端に試験片を装着して試験片先端にベアリングを介して重錘負荷を与える方式にした。主軸の回転数をフォトセンサーで常時検出し、破断時に重錘がマイクロスイッチを遮断して試験片の破断寿命を明示させる方法をとった。

また、1組のS-N曲線を求めるにあたり、20本の試験片を準備し、傾斜部を求めるのに10本程度を割り当て、残りの10本程度の試験片を用いて、ステアケース法に従って疲労限度の平均値と標準偏差を求めること

3. 実験結果および考察

各研究分担者ごとに上述の手法で得られた疲労試験結果をS-N線図として示したのが、Fig.5(a)~(l)である。図において白抜きのマークは表面起点型破断試験片に対する結果を示し、黒塗りマークはフィッシュアイを伴う内部起点型破断試験片に対する実験結果を示す。

なお、本実験結果についても、Fig.5(a), (c), (k)で顕著にみられるように、2章に示した従来の結果と同様、S-N曲線が一旦水平に折れ曲がった後、 $N=10^7$ 付近から再度低下する明らかな傾向が認められる。この部分の斜線については、当該領域の実験結果をもとに目視により最も自然と思われる曲線を破線で描いた。

図より、いずれの分担者の実験結果についても、S-N曲線が水平に折れ曲がる限界繰返し数は $10^5 \sim 10^6$ 付近にあるように思われるが、同図(c)において特に顕著なように単にS-N曲線の2段折れ曲がりでは表示できないような場合もある。すなわち、この事実は或る応力域において表面起点型破断と内部起点型破断がともに発生しうること示すものである。この傾向は図(c)に

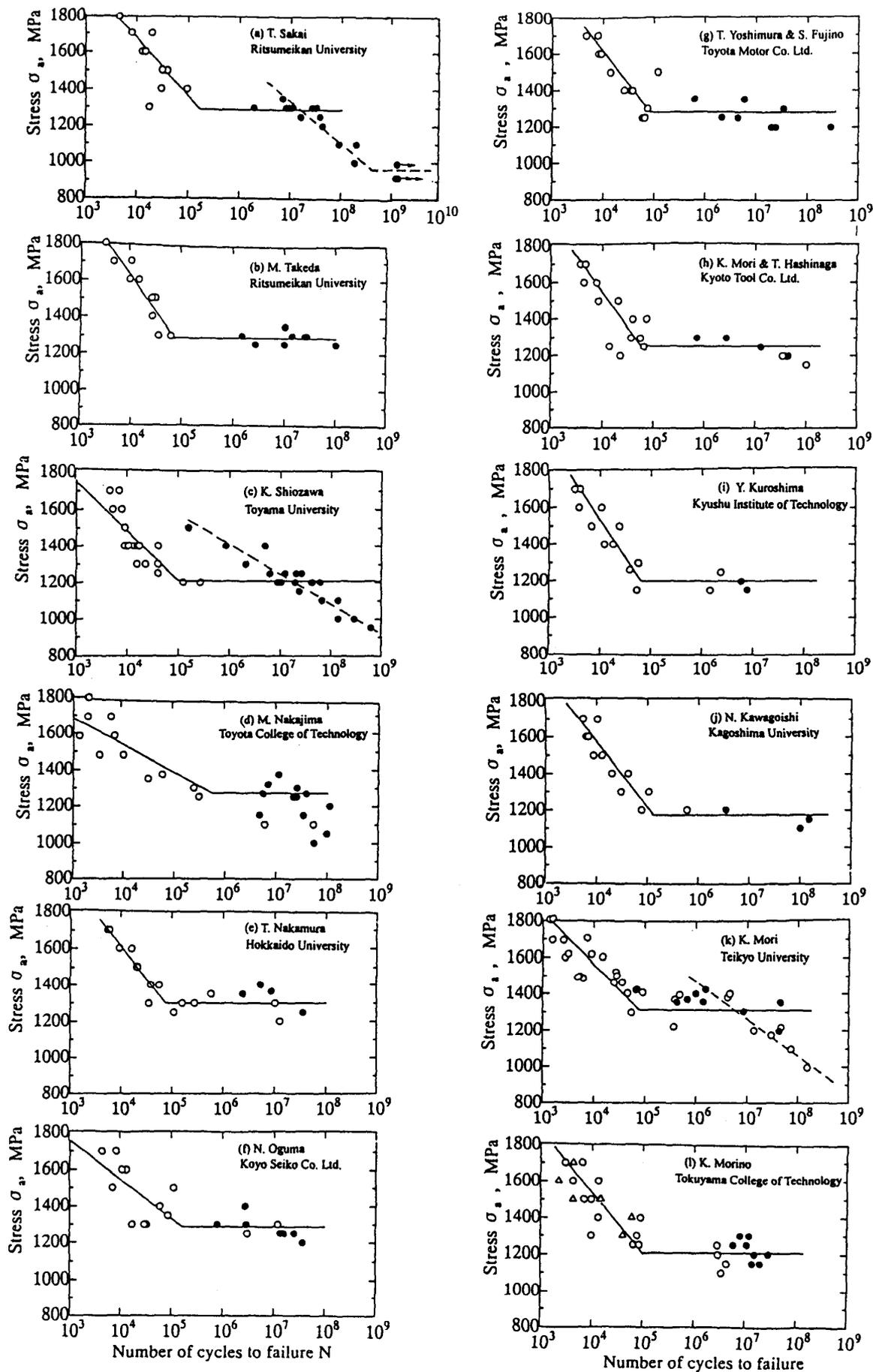


Fig.5 Individual S-N plot for SUJ2 steel obtained by the respective researchers.(○:Surface failure ●:Fish eye failure)

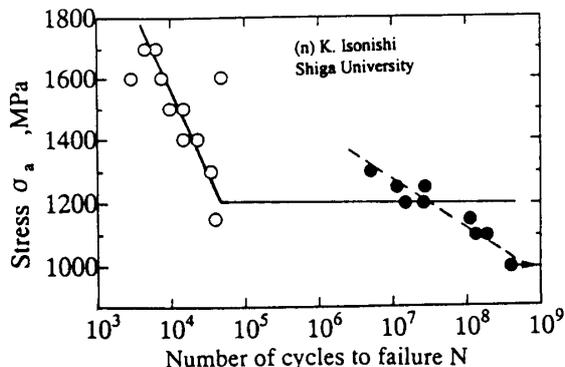
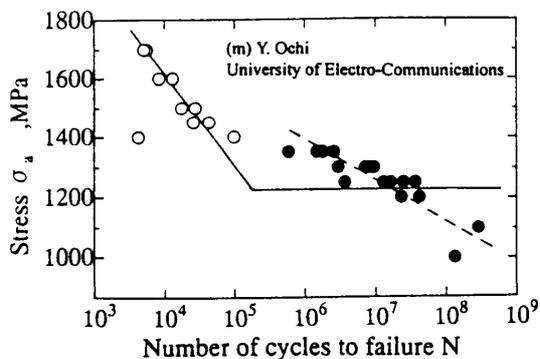


Fig.5 Individual S-N plot for SUJ2 steel obtained by the respective researchers.(continued)

において顕著であるが、図(a)や(k)においてもかなりの応力範囲において、表面起点型破断と内部起点型破断が混在しており、これを単純に1本の折れ曲がった S-N 曲線の回りに現れたばらつきと考えるのは不自然である。すなわち、表面起点型破断の S-N 曲線と内部起点型 S-N 曲線が、別の場所にずれて二重に現れていると考える方が自然である。したがって、これまで「S-N 曲線の2段折れ曲がり現象」のような表現がしばしば用いられてきたが、むしろ、このような S-N 曲線を「二重 S-N 曲線」とよび、このような疲労特性を「二重 S-N 特性」とよぶ方が、実態をよりよく表現すると判断される。それゆえ、本報では以降、この表現を用いることとする。

以上の12組の疲労試験結果は、同一の材料、同一の試験片形状・寸法、同一の試験機など、可能な限り条件を統一して計画的に得られた実験結果であり、これらをすべて併合して、新たな S-N 線図として再プロットしたのが Fig.6 である。図中、すべてのデータの分布状況を注意深く観察すると、白抜きマークで示した左側の S-N 曲線と、黒塗りマークで示した右側の S-N 曲線が、かなり明確に分離して現れていることがわかる。なお、いずれのグループに属するデータも、各々の中央 S-N 曲線の回りに大きなばらつきを伴っている。

すなわち、本材料の疲労破断形態には表面起点型破断と内部起点型破断があり、各々の破断形態に対する

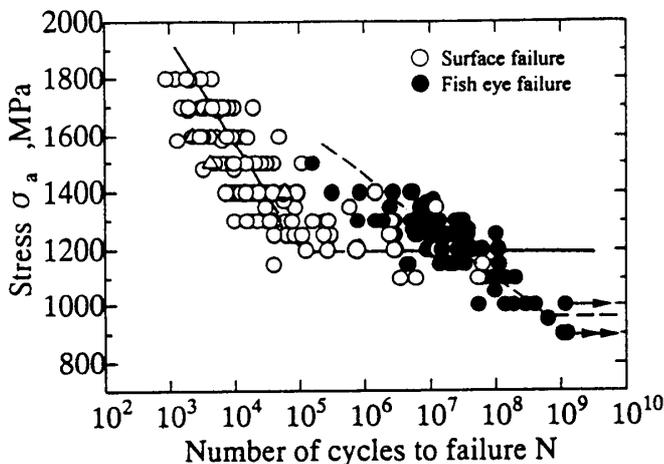
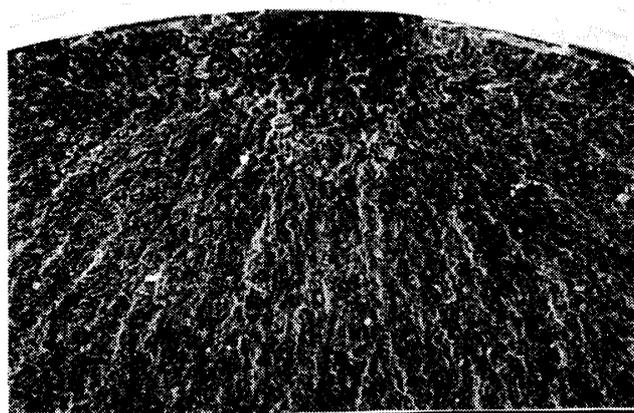


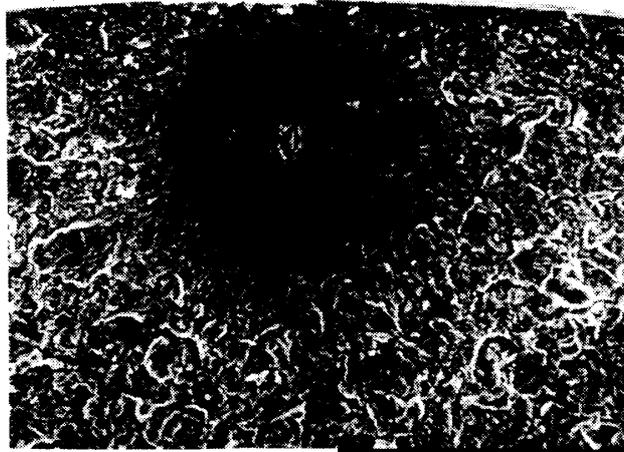
Fig.6 S-N plots pooled whole data in Fig.5

S-N 曲線は、S-N 座標上で別の位置にずれて現れる。内部起点型破断の S-N 曲線は、表面起点型破断の S-N 曲線より長寿命側に現れ、その疲労限度は前者の疲労限度より著しく低下するようである。また、各破断形態に属する実験結果は、いずれもそれぞれの中央 S-N 曲線の回りに大きなばらつきを呈し、応力レベルに依存して各々の破断形態が現れる比率が傾向的に変化する傾向がある。以上、これまでに高強度鋼を中心に、各種高強度金属材料に関して、しばしば2段折れ曲が



$\sigma = 1600\text{MPa}$, $N = 9140$

(a) Fracture surface of surface originated failure



$\sigma = 1300\text{MPa}$, $N = 24376900$

(b) Fracture surface of inner originated failure

Fig.7 SEM observations of fracture surfaces

り現象として報告されていた広寿命域における奇異な疲労特性に対する検証実験を行い、これが表面起点型破断と内部起点型破断の2つの破断形態の混在に起因する現象であることが明らかになった。

なお、破断試験片の破面はすべてSEMで観察して破壊起点を確認した。Fig.7は上記の各破断形態に対する代表的な破面写真を示すもので、同図(a)は負荷応力 $\sigma=1600\text{MPa}$ で $N=9140$ cycleにて表面起点型破断をした試験片の破面を示す。他方、同図(b)は負荷応力 $\sigma=1300\text{MPa}$ で $N=24376900$ にて内部起点型破断をした試験片の破面を示し、明瞭なフィッシュアイが観察される。Fig.6から解るように、 $S-N$ データは表面起点型破断と内部起点型破断に傾向的に分離して現れているが、一部、互いに入り混じって現れているものも認められる。したがって、破断形態の分離現象についても確率論的な取り扱いが必要となる。

Fig.6において同一応力レベルで30個以上のデータが含まれる3つの応力レベルを選んで、疲労寿命分布をワイブル確率紙上にプロットしたのがFig.8である。Fig.6の $S-N$ 線図から予想されるように、Fig.8中の寿命分布は表面起点型破断データと内部起点型破断データに分離されており、単一のワイブル分布で表示することは困難である。そこで、各破断形態ごとの寿命成分を3母数ワイブル分布で表示し、これらの成分の和として与えられる混合分布により、Fig.8の分布特性を解析的に説明してみたい。表面起点型破断の生起確率を P_s 、内部起点型破断の生起確率を P_i とすれば、混合分布の寿命分布は次式で与えられる。⁹⁾

$$F(N) = P_s F_s(N) + P_i F_i(N) \quad (1)$$

なお、常に次式が成立する。

$$P_s + P_i = 1 \quad (2)$$

各寿命成分 $F_s(N)$ 、 $F_i(N)$ については、いずれも次式の3母数ワイブル分布を仮定する。

$$F(N) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{N-c}{b}\right)^a\right\} \quad (3)$$

ここに、 a : 形状母数、 b : 尺度母数、 c : 位置母数であり、各母数は相関係数法で容易に推定できる。¹⁰⁾ 上式(1)、(2)、(3)を用いて計算された本材料の疲労寿命分布を示したのが、Fig.8中の各曲線である。こうして解析された寿命分布は実験結果の分布特性をよく表示しており、本節の解析が一つの試みとして重なる妥当性をもつことがわかる。また、多重モード分布とした取り扱いも可能であることを付記する。

4. 結 言

本研究で得られた主な結果を要約すれば、以下のとおりである。

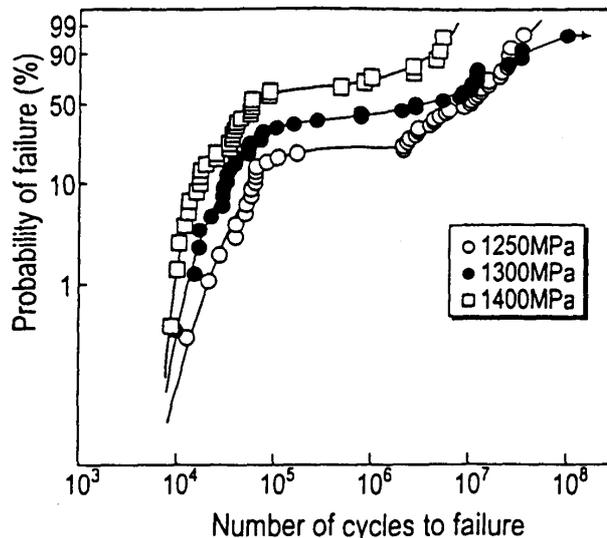


Fig.8 Weibull plots of fatigue life distributions

(1) 各種高強度鋼について、 $S-N$ 曲線が $10^5 \sim 10^6$ の繰返し数範囲内で水平に折れ曲がり、一旦明確な疲労限度が現れた後、 $N=10^7$ 付近から再び低下する $S-N$ 特性が多数報告されている。この特徴を詳細に確認するために、SUI2鋼に対する疲労試験を同一条件で多数組実施し、全データを併合して広寿命域の疲労特性を調べた結果、上記の傾向的特徴が明瞭に確認された。

(2) 全破断試験片についてSEMで破面観察を行った結果、表面起点型破断と内部起点型破断に明確に区別され、内部起点型破断の際はいずれも明瞭なフィッシュアイが観察された。また、各々の破断形態ごとに固有の $S-N$ 曲線があつて、これら両者が $S-N$ 座標上で別の位置にずれて現れることが分かった。この意味から、このような疲労特性を二重 $S-N$ 特性とよぶことが適切と判断される。

(3) 表面起点型破断および内部起点型破断の各寿命成分から構成される混合分布により、本材料の複雑な寿命分布特性がよく説明できることがわかった。

参考文献

- 1) 増田、西島、田中、日本機械学会論文集, 52A, p.847(1986).
- 2) 外山、菅田、宮原、熱処理, 32, p.315(1992).
- 3) 金澤、西島、材料, 46, p.1396(1997).
- 4) 浅見、熱処理, 25, p.123(1985).
- 5) 浅見、杉山、熱処理, 25, p.147(1985).
- 6) T.Naito, H.Ueda, M.Kikuchi, Metal Trans., 15A, p.1431(1984).
- 7) 浅見、弘永、材料, 43, p.12(1994).
- 8) 酒井他9名、材料強度の統計的性質、(株)養賢堂、(1992).
- 9) 星出、酒井、境田、機械の研究, 48, p.1190(1996).
- 10) 酒井、田中、材料, 29, p.17(1980).